

変位依存型ダンパーを用いた免震建物の変位制御設計の提案とその有効性の検証

著者	佐上 瑤子
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4497号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61755

氏 名	さがみ ようこ
授 与 学 位	佐上 瑤子
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成23年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学専攻
指 導 教 員	変位依存型ダンパーを用いた免震建物の変位制御設計の提案とその有効性の検証
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 井上 範夫
	主査 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 源栄 正人
	東北大学教授 植松 康 東北大学准教授 五十子 幸樹
	准教授 堀 則男
	(東北工業大学)

論文内容要旨

1995年の兵庫県南部地震において、新耐震設計法によって設計された建築物は概ね崩壊せず、耐震設計の進歩を確信させた。しかしその一方で、建物の機能喪失は著しく、病院・消防署・警察施設などの防災拠点は機能停止に追い込まれるなどの問題点が認識された。耐震設計は、単に構造躯体の崩壊を防ぐ終局安全性を確保するだけでなく、地震発生後に建物の機能を維持できる損傷の軽減をめざすことが求められ始めた。

また 1998 年に建築基準法が改正され、仕様規定から性能規定へ移行したことにより、新しい構造方式の適用が容易となった。さらに 1995 年兵庫県南部地震により、制振や免震のメカニズムを利用した建物の安全性が確認されたことにより、制振や免震構造を適用した設計法が注目されるようになった。

免震建物は、地震動の主要な周期成分よりも構造システムを長周期化することにより、地震時の応答加速度を大幅に低減するという考え方を実現した構造である。即ち、地震動のスペクトル特性を考慮して、構造物の周期調整と減衰付与により応答制御を行うものであり、現在までに多くの実地震観測による免震効果の実証も進められてきている。これに対して、2003年十勝沖地震において、震源より遠く離れた地域においても、石油タンクのスロッシング現象により巨大地震、長周期地震動が多大な被害を及ぼすことが分かった。この地震をきっかけとして、大規模な海洋型地震により、厚い堆積地盤上で長周期成分が卓越する継続時間の長い地震動が発生する可能性が指摘されるようになった。

また、2010年12月には、国土交通省より「超高層建物等における長周期地震動への対策」として、観測データに基づく設計用長周期地震動の作成手法が示され、高さが 60 メートルを超える建築物及び免震建築物のように、時刻歴応答解析による大臣認定を受ける建築物においては、構造計算の適用時に、極めて稀に発生する地震動として検討を行うこととしている地震動に加えて、建設地で発生すると想定される長周期地震動 1 波以上による検討を行うことを認定の審査において求めることとなった。そのほか、既存の高さが 60 メートルを超える建築物

及び免震建築物のうち、大臣認定を受けた建築物は、既に短周期成分から一定の長周期成分まで含む複数の地震動について、建築物が倒壊・崩壊しないこと等を確かめているが、特に長周期地震動による影響が大きい一部の建築物についての再検証を要請することとなった。

このように免震構造などの長周期構造物や高層化が進む超高層構造物に対して、今後長周期地震動やこれまでの設計の想定規模を超えた極大地震動の発生により、これまで必ずしも構造設計の決定的要因ではなかった構造物の地震時最大応答変位が設計を決定する要因となる場合が増加し、構造物の動的設計という観点において最大応答変位の直接的な制御に焦点が移行していくものと考えられる。

本研究では、今後構造物の耐震設計において動的設計の観点からより重要度が増すであろう変位応答に焦点をおいた耐震設計、即ち変位に依存して減衰力を発揮し、最大応答変位を直接的に制御する設計を「変位制御設計」と呼び、変位制御設計に基づく変位依存型ダンパーの提案を行う。また、速度依存型ダンパーと変位依存型ダンパーの比較検討を通して、変位依存型ダンパーの有効性ならびにその可能性について示す。

本論文は、全6章により構成されている。以下に各章の内容について要約する。

第1章 序論

第1章では、本研究の背景、目的、論文構成と本研究に関連する既往の研究の概況について述べている。

第2章 セミアクティブ制御手法の比較検討

第2章では、免震層にセミアクティブダンパーを設置して、制御手法の違いによる応答低減効果について検討を行い、免震層の応答変形と上部建物の応答加速度を効果的に低減するセミアクティブ制御手法の構築について述べている。まずは、複数の応答項目を評価して最適な制御力を算定する最適レギュレーター理論に基づいた制御手法を適用し、地震応答解析によって応答性状の検討を行っている。最適制御でのダンパー制御力の算定においては、免震層及び上部建物における全層の応答速度、応答変形の情報が必要であり、多数のセンサーが必要であること、計算時間の増加、反応時間の遅れなど、実用上の問題が生じると考えられる。従って、次の段階として免震層の応答速度と応答変形のみに基づいた簡易な制御手法について考え、最適制御の簡略化、免震層のエネルギー応答に基づいたEF制御(Energy Function制御)の検討を行い、さらに、免震層の応答変形のみを用いた簡易な制御手法である加速度低減制御の構築を試みている。

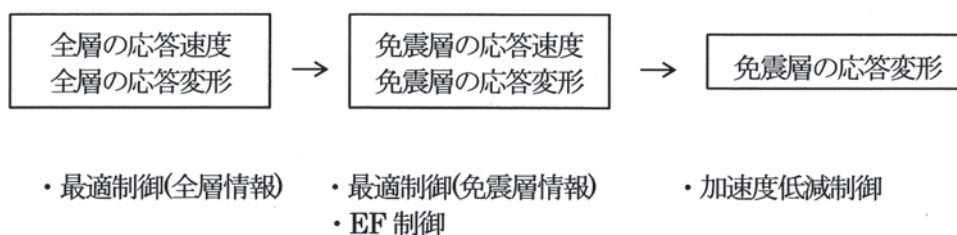


図1 制御構築過程

第3章 複素剛性を用いた制御則モデルによる変位依存型ダンパーの提案

今後、免震構造などの長周期構造物においては長周期地震動や巨大地震動を踏まえた構造物の動的設計が求められており、最大応答変位の直接的な制御に焦点が移行していくものと考えられる。そこで第3章では、応答変位を直接的に制御し、変位の大小に応じてダンパー力を変化可能な変位依存型ダンパーの提案を行っている。提案をするにあたり、同様に変位に応じてダンパー力を変化する加速度低減制御から変位依存型ダンパーの構築することを考えた。しかし加速度低減制御は、制御力が象限ごとに異なる式を用いて算定され刻々と変化するため、微分などの計算ができない。そこで、加速度低減制御と同様に変位のみの応答制御が可能であり、線形振動論でダンパー力の大きさを決定できるモデルとして、複素剛性を用いた制御則モデルによる変位依存型ダンパーの提案を試みている。

第4章 変位依存型ダンパーの実験的検討

第3章で示した複素剛性を用いた制御則モデルによる変位依存型ダンパーは、実時間領域で実現しようとした場合に、複素剛性の非因果性が問題となり、実時間領域における制御則を実現することは困難である。そこで、第4章では変位依存型ダンパーを模擬する制御手法として可変楕円制御の構築を行い、実験的検討を行っている。実験にあたり、セミアクティブダンパーの一つであるMRダンパーを免震試験体に設置し、可変楕円制御を行うことで、変位依存型ダンパーの実現可能性について示している。

第5章 変位依存型ダンパーを用いた変位制御設計の有効性の検証

第5章では、第3章で示した変位依存型ダンパーの有効性およびその可能性について検証を行っている。免震設計においては、減衰付与の手法として、履歴系ダンパー、流体系ダンパーによるものが主流であり、流体系ダンパーのダンパー力は、これまで速度に応じてダンパー力を発揮する粘性減衰によるものが多く用いられてきた。しかし、長周期地震動や巨大地震動発生時においては、過大な免震層変形が生じる可能性が高く、変位に応じてダンパー力を決定する変位依存型ダンパーの重要性が増すものと考えられる。そこで、変位依存型ダンパーと速度に応じてダンパー力を発揮する速度依存型ダンパーの比較検討から、変位依存型ダンパーの有効性について示している。最後に、地震動の周期特性の違いによるダンパー性能の違いについて検討を行うため、変位依存型ダンパーと速度依存型ダンパーのダンパー割増率の検討を行っている。免震告示(免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術基準(平成12年建設省告示第2009号))においては、ダンパーの応答せん断力を決定するにあたり応答速度と擬似速度のずれを考慮してダンパー割増率を定めており、告示波の場合には、概ねその値を2とすることが示されている。今後、極めて稀に発生する地震動や長周期地震動や巨大地震動に対しての動的設計を行うには、ダンパー割増率をいかに定めていくかといった点において重要な要素となるものと考えられる。今回地震動の特性の一つである地震動周期特性に着目し、それぞれの地震動に応じたダンパー割増率について検討を行い、さらに変位依存型ダンパーと速度依存型ダンパーのダンパー割増率の関係について示している。

複素剛性は、地盤相互作用を表すものとして用いられることが多く、実部及び虚部の関係を示すと図 2(a)のよう
に表現できる。また、速度依存型ダンパーは、速度に応じた減衰項を持つため、振動数 ω に比例した形で表現
され、免震層全体として図 2(b)のように表される。一方変位依存型ダンパーは、変位に応じた減衰項を持つため、
振動数 ω に依存せず一定の値となり、免震層全体としての図 2(c)のように表される。

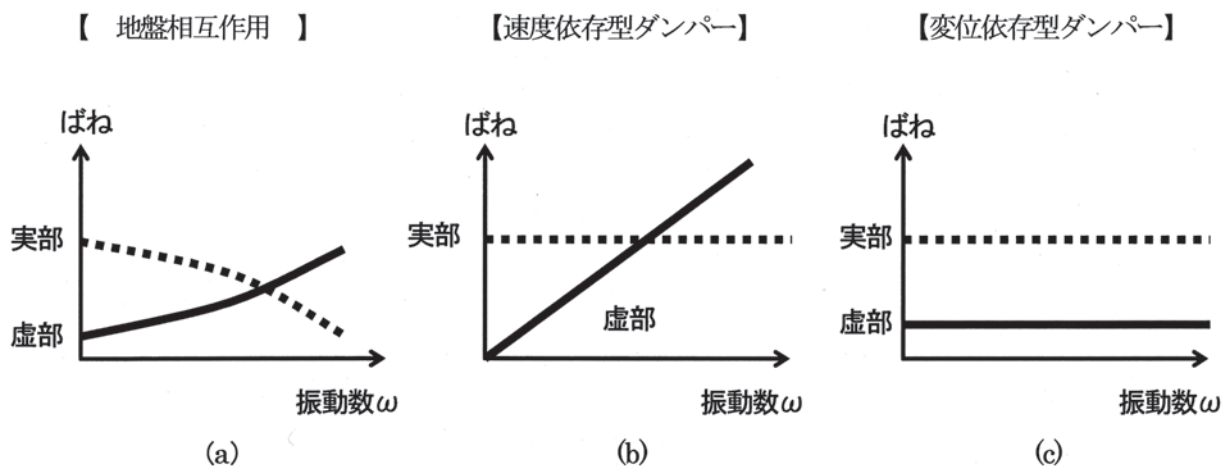


図 2 振動数とバネ定数の関係

第 6 章 結論

第 6 章では、本論文の結論および今後の課題について述べている。

論文審査結果の要旨

阪神淡路大震災を契機として、建物に対してより高い耐震性を求める社会的要求が高まり、地震時の建物の損傷を制御する免震構造が多く採用されるようになった。本論文は、免震建物を対象として、その免震層にセミアクティブダンパーを設置して、免震層の応答変形と上部建物の応答加速度を効果的に低減することを目的として、変位依存型ダンパーを用いた変位制御設計を提案し、地震応答解析を行ってその有効性を示したもので、全6章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、免震層に磁気粘性流体ダンパーを設置して、免震層の応答変形と上部建物の応答加速度を効果的に低減することを目指して、最適レギュレータ理論に基づく制御や免震層のエネルギー応答に基づく制御を検討し、これらを踏まえて、免震層の応答変形のみを用いた簡易な加速度低減制御を提案した。さらに、免震層の応答変形を同じ値に揃えて比較検討を行い、加速度低減制御は、上部建物の応答加速度、応答層せん断力、応答層間変形を他の制御法よりも低減することができ、その有効性を示している。

第3章では、効果的な方法である加速度低減制御をより一般化し、線形振動論でダンパー力の大きさを決定できるようにすることを目的として、ダンパー力と免震層変形の関係を複素剛性で表現することを提案し、この性能を発揮できるダンパーを変位依存型ダンパーと定義した。このダンパーによれば、免震層応答変形が大きくなればダンパー力が大きくなり、この特性は振動数によらないことになる。そのため、免震層応答変位を直接的に制御することが可能になり、長周期地震動や巨大地震動時の過大応答変形を抑制するためには効果的な制御法であることを指摘している。

第4章では、複素剛性に基づく変位依存型ダンパーは、一般的に周波数領域での計算を行うために入力地震動の全時間情報が必要になるため、実時間領域での制御が困難となるので、実時間領域で複素剛性に基づく制御を模擬できる可変楕円制御を提案し、縮小試験体を用いた振動台実験でその可能性を検討した。その結果、ほぼ同等な効果が得られることを示している。

第5章では、複素剛性に基づく変位依存型ダンパーと、一般的なオイルダンパーなどの速度依存型ダンパーを設置した免震建物の地震応答解析を行い、短周期成分が卓越した地震動が長周期の免震建物に入力した場合、免震層の応答変位が同じならダンパー力と総入力エネルギーが大幅に低減されることを示し、変位依存型ダンパーの有効性を明らかにしている。さらに、この理由について周波数応答による検討を行い、建物速度伝達関数と地震動のパワースペクトル密度の関係から説明できることを示している。また、速度依存型のダンパー力と変位依存型のダンパー力の比は、地震動の速度スペクトルと擬似速度スペクトルの比で表せることを示し、これをダンパー割増率と定義し、さまざまな記録地震動を対象としてその数値を検討して、現行の告示で提案している値はその平均的なものであることを指摘している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、免震建物を対象として、免震層の応答変形と上部建物の応答加速度を効果的に低減できるダンパーを提案し、地震応答解析を行ってその有効性を示すものであり、免震建物の地震時安全性を向上させることに寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。